

河川表面のハイビジョンビデオ映像を用いた 吉野川洪水流の流量・流速計測

MEASUREMENTS OF DISCHARGE AND SURFACE VELOCITY DISTRIBUTION OF THE YOSHINO RIVER FLOOD USING A HI-VISION VIDEO CAMERA

藤田一郎¹・椿涼太²・岡部健士³・富尾恒一⁴・藤井啓⁵
Ichiro FUJITA, Ryota TSUBAKI, Takeshi OKABE, Koichi TOMIO and Akira FUJII

- ¹正会員 学術博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
²学生会員 工修 神戸大学大学院自然科学研究科後期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
³フェロー会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)
⁴学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科前期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
⁵学生会員 神戸大学工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

In recent years, two non-intrusive river-surface flow measurement methods using video images, the large-scale particle image velocimetry (LSPIV) and the space time image velocimetry (STIV), have been developed by the authors and come to be used in actual river flow situations. These methods are useful because they can be applied to efficient utilization of ITV facilities installed near a river. However, due to the lack of spatial resolution of the conventional video system, measurement accuracy would become not enough when the river width is relatively large or the vertical viewing angle is small. Therefore, for improving the measurement accuracy, we utilized a hi-vision video camera with a resolution four times higher than that of the conventional one and made measurements of the flood occurred in the Yoshino River in 2005. In the analysis, the performance of the two methods was compared and it was confirmed that STIV is more efficient than LSPIV for flood discharge measurement.

Key Words : River flow measurement, surface flow, image analysis, non-intrusive measurement, LSPIV, STIV, discharge measurement

1. まえがき

これまで藤田らは、河川の表面流れを撮影したビデオ映像の画像解析から表面流速分布を求める非接触型の流速計測法の開発および、準リアルタイムの計測システムの構築を行ってきた¹⁻³⁾。ここで開発されたのは、可視化画像の解析法として確立しているPIV (Particle Image Velocimetry)⁴⁾を河川表面流画像に適用した手法でLSPIV (Large-Scale PIV) と呼ばれ、国外でも利用されている⁵⁻⁶⁾。このようにLSPIVはすでに実用化され、実際の河川流計測にも利用されるようになってきた。この手法の利点はその非接触性や面的計測性にあり、迅速性、経済性あるいは浮子軌道の信頼性などの点で必ずしも十分とは言えない従来の浮子計測⁷⁾を補完する方法としてその優位性を保っている。この方法は、近年の洪水災害の頻発に鑑み、一級河川だけでなく中小河川にも配備されるようになってきた河川監視カメラ (ITV) の利活用

の一手段として重要だが、通常のビデオ規格の画像サイズ (640x480画素程度) では、空間解像度が必ずしも十分でないため、河川幅が広い場合や撮影の俯角が小さい場合には計測精度の低下が懸念された。そこで、本研究では通常のビデオの約4倍の解像度を持つハイビジョンビデオカメラを用いて実際の洪水流の撮影を行い、高解像度撮影の有用性について検討した。また、従来法の欠点を補う手法として最近、藤田らが提案したSTIV (Space Time Image Velocimetry)⁸⁻¹⁰⁾との比較を行い、実用性や計測精度についての比較検討を行った。

2. 現地観測

(1) 観測地点の概要

観測地点は、徳島県三好郡三好町太刀野付近の吉野川で河口からは約64km、角の浦橋の直上流に位置する。水文量の観測地点としては、上流に池田 (河口より約75km)、

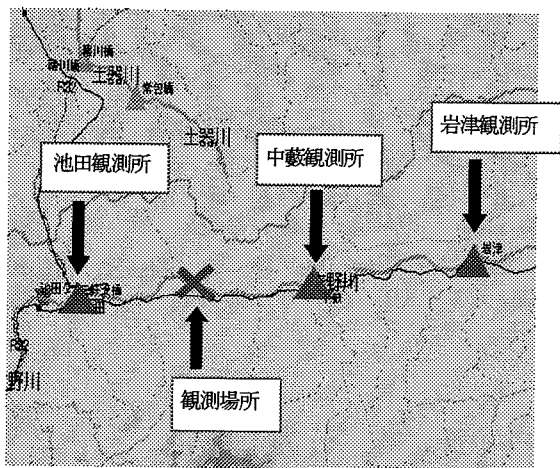


図-1 水位流量観測所と観測地点の位置関係

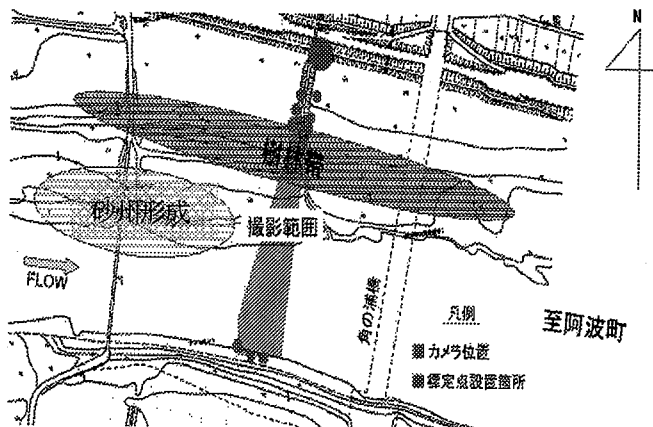
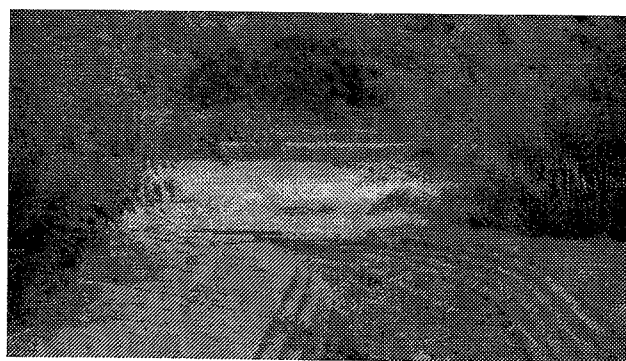


図-2 観測地点周辺の状況



(a) 平水時(2005.3.26 PM1:00)



(b) 洪水時(2005.9.7 AM7:10)

図-3 平水時と洪水時の水位比較

下流に中藪(約54km), 岩津(約40km)の水位観測所がある(図-1)。図-2に示した詳細図からわかるように, 撮影地点周辺は左岸に沿って竹林繁茂による樹林帯が連続している点が特徴である。ビデオ撮影地点は近くにポンプ排水施設があり, 本川に通じる部分の樹林帯が伐採されている左岸堤防上に設けた。ただし, 事前調査で部分的な竹林の倒れこみにより視界が遮られていたため, 視野を確保するための最低限の伐採は行った。

また, 表面流画像解析には, 座標既知の標定点を予め設置しておく必要があるが, 左岸側(ビデオ側)はスペースに余裕があったため, 6本の杭を設置して標定点とした。対岸は, 撮影地点から300メートル程度離れておりしかも竹林が密生していたため, 真ん中に黒い丸印をつけた3枚の大きなシートを竹と竹の間にくり付けて標定点とした。各標定点の設置は, ビデオ撮影画像内にうまく入るように位置を調整しながら行った。これらの作業は事前調査(7月10日)の際に行ったが, 洪水時には, 手前杭の水没が予期されたので, 各杭の位置にポールを立てて標定点の代用とした。

(2) ビデオ撮影時刻とハイドログラフの対応関係

ビデオによる撮影は, 平成17年9月6日から7日にかけて, 台風14号の影響で発生した洪水流を対象として行った。撮影に用いたのは民生用ハイビジョンデジタルビデオカメラ(SONY製, HDR-FX1)で, HDV1080i(インターレース)規格での映像記録が可能な機種である。画素数は1440x1080で, 通常のDV規格のデジタルビデオ(720x480画素)の約4倍の解像度を有する。

実際の撮影は, 9月7日の午前6時から午前11時にかけておよそ1時間毎に行った。各撮影時間は5分程度である。撮影時の天候は小雨であった。平水時と洪水時の画像を図-3に比較した。洪水時には水位が大幅に上昇し, 手前にまで水面が及んでいることがわかる。洪水時の画像では手前や対岸の標定点が確認できる。今回撮影した洪水の規模を把握するために, (財)河川情報センターのHPから得た主要な水位データ等を表-1にまとめた。これより, 今回対象とした洪水は, 池田で危険水位を上回るなど既往最大に匹敵する大きな洪水であったことがわかる。各地点の水位ハイドログラフを図-4に比較した。これより, 水位のピークは1時間程度で池田地点から下流の中藪観測所まで到達していることがわかる。図-4には観測の時間帯も示しているが, 残念ながら今回は水位の

表-1 主要な水位データ等

	岩津	中藪	池田
計画高水位(m)	12.94	11.37	11.87
危険水位(m)	6.80		8.15
警戒水位(m)	5.30		6.70
既往最高水位(m)	7.22 2004.10.20	8.85 2004.10.20	10.50 2004.10.20
今回最高水位(m)	6.49 2005.9.7 AM3:00	7.8 AM3:00	9.01 AM2:00
零点高(m)	AP29.16	AP45.75	AP73.36

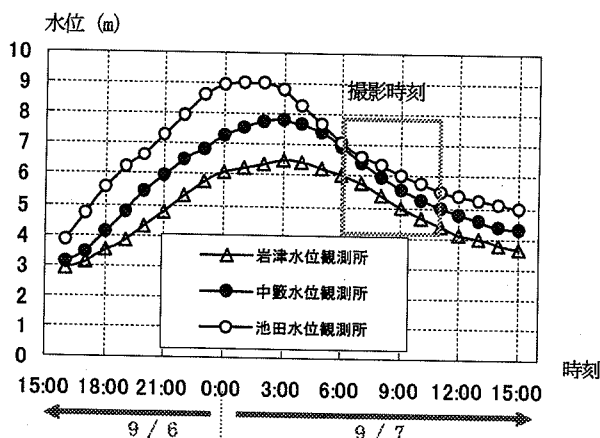


図-4 水位ハイドログラフの比較

ピークが通過後、4時間程度経た後の水位低減時の観測となった。夜間での撮影が可能な暗視機能付きのITV施設あるいは熱映像を対象とするビデオカメラなどが利用できれば、洪水イベント全体の観測が可能となるはずである。

(3) 洪水流量の推定

流量計測は撮影地点では行っていないが、約10km上流の池田観測所では浮子計測が実施されている。その結果をもとにして得られた流量ハイドログラフを図-5に示す。ピーク流量は、9月7日午前2時に9300m³/sに達している。池田と中藪の観測所間の距離約21kmと池田と観測地点の距離11kmを考慮して算出した流量通過のタイムラグは約32分となる。実際には、洪水波の時間的な変形や途中の河道区間への流入などもあるため、必ずしも正確な推定値とは言えないが、今回はこれらの影響を無視しこのタイムラグに基づいて観測地点における各観測時の流量を計算した。また、観測地点の水位には、ビデオ設置地点に隣接したポンプ場のデータを用いることができた。なお、池田・中藪間の平均河床勾配は約1/760である。

(4) 撮影の俯角

今回の現地計測地点には高所からの撮影が可能な場所

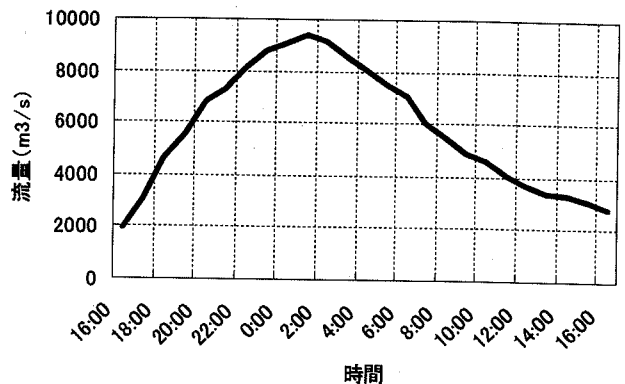


図-5 流量ハイドログラフ(池田, 暫定値)

や施設がなかったため、河岸からの直接の撮影となった。水面を見おろす鉛直俯角は、観測中に水位が2m程度変化したため一定ではないが、対岸で約2度、手前で約10度であった。LSPIVでは、通常、10度程度を俯角の目安と考えているので対岸付近の計測について言えば、今回の撮影条件はかなり厳しいものだったと言える。ただし、ITV施設などのように高い位置からの撮影や、今回のような高解像度のビデオ機器の導入により、ある程度の問題解消が期待できる。

3. 表面流の画像解析

(1) LSPIVとSTIVの機能比較

画像解析では画像濃淡のパターンマッチングに基づく手法 (LSPIV)²⁾ と、主流方向に想定した検査線上の時空間画像を用いる手法(STIV)¹⁰⁾ を比較した。両解析とも洪水時に河川表面に現れる波紋には方向性がなく、そのパターンはマクロ的には表面流速で流下方向に移流すると仮定し、それらを自然トレーサとして利用している。ここでいうマクロ的とは、数メートル四方の空間 (LSPIV)、あるいは主流方向にとった十メートルオーダーの線上(STIV)の流れの平均を対象にすることである。両手法の違いは、LSPIVでは幾何補正した変換画像を対象として相互相関に基づくパターンマッチングから二次元的な流速分布を算出するのに対し、STIVでは主流方向に設定した検査線上の輝度分布の時空間画像に現れる縞パターン勾配から、検査線上の平均流速を算出する点にある¹⁰⁾。画像の幾何変換や相関演算がない分だけSTIVの方が計算効率が高い。

(2) 波紋と表面浮遊物の移流速度の比較

波紋の移流速度に関する仮定は、実河川の洪水流を対象としたこれまでの画像解析で得られた流速と流木や浮子などの浮遊物の流速がよく一致することからほぼ妥当なものと考えられる。ただし、風の影響が大きい場合は

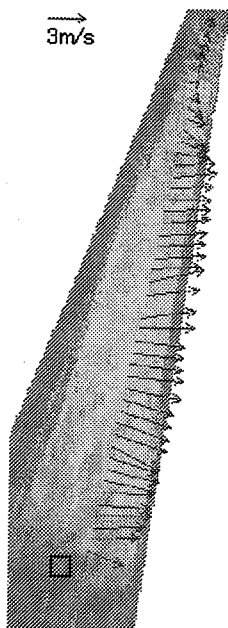


図-6 LSPIVによる平均流速ベクトル
(2005. 9. 7, 9:00)

その影響が無視できなくなるため、何らかの補正が必要になる。後述するように今回の観測では、表面を浮遊する流木と波紋の移流速度はほぼ一致した。

(3) LSPIVによる解析

ハイビジョンビデオカメラで撮影した映像は、一旦、PCに動画(約2GB)として取り込み、それを連番の静止画像に変換して解析に用いた。解析には450枚(15秒間)の画像を用い、解析の時間間隔は0.1秒とした。マッチングのテンプレートサイズは25×25画素とした。1画素を0.3mとして画像変換を行ったので、河川表面上では7.5×7.5mの空間内の波紋のパターンについてマッチングを行っていることになる。得られた平均流速ベクトルプロットの1例を図-6に示す。図中の四角はテンプレートサイズ(一辺7.5m)を示している。流向にばらつきが見られるが、概ね良好な結果が得られている。ただ、実際の動画像を注視すると、特に高流速が発生する対岸側(図の下側)で水面の上下変動が大きく、しかも俯角が小さいためにその影響が幾何補正後の画像上で流れに対して横方向の変動として現れた。そのため、LSPIVの適用においては、特に俯角が小さくなる遠方ほど横断方向成分の計測精度の低下は避けられないものと思われる。

計測断面の横断河床形状を図-7に示す。図-3(a)からもわかるが、撮影地点の手前(左岸)では砂州が発達しているため、滞筋は対岸(右岸)側にずれている。図には、観測中の最高水位も示しているが、右岸まで水位が及んでいることがわかる。LSPIVで得られた各計測時刻の流速分布を図-8に比較した。流量の減少に伴って最大流速

標高A.P (m)

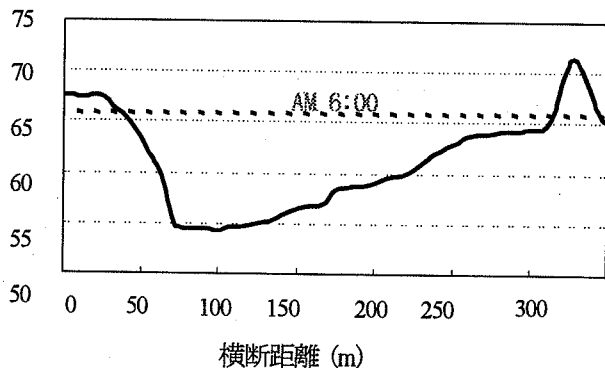


図-7 河床断面図(観測地点付近, 64km)

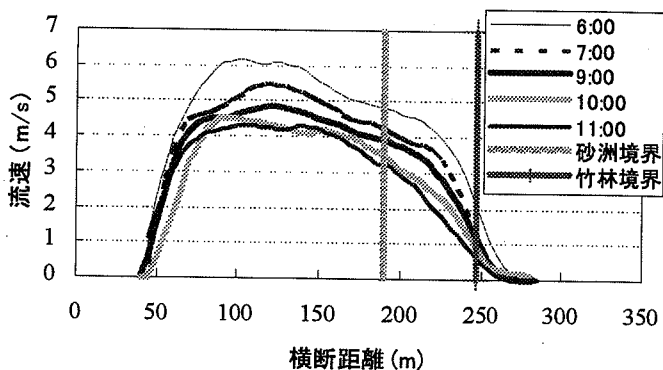


図-8 流速分布の時間変化(LSPIV)

が6m/sから4m/s程度まで減少している様子が得られている。流速分布は図-7の河床形状によく対応し、右岸側に最大流速が生じる非対称な分布となっている。図には、竹林樹林帯および砂州のおよその境界線も示したが、特に竹林の樹林帯の前面では流速の著しい低下が見て取れる。

(4) STIVによる解析

STIVの解析では、幾何補正した画像をモニターに表示し、横断測線に直交する検査線の本数や長さを指定できるように解析プログラムに改良を加えた。図-9にSTIVで用いる時空間画像、コヒーレンシー分布および勾配値ヒストグラムの一例を示す。この例では、流れの主流部にとった検査線(長さ200画素)のデータを示した。図-9(a)の時空間画像には、右下方向に傾いた縞パターンが得られている。暗い部分と明るい部分はそれぞれ水面の局所的な凹凸に対応しており、この画像から水面のパターンが多少の変形をしながらも、マクロ的に見るとほぼ一定の速度で流下していることがわかる。図-9(b)に示したコヒーレンシーは、縞パターンの強さを表す指標であり、0が無パターン、1が明確なパターンに対応する。STIVでは、図-9(a)のように得られた時空間画像(200×450画素)上に適当なサイズの検査領域(図の場合では25×25画素)を格子状に配置し、各検査領域でコヒーレン

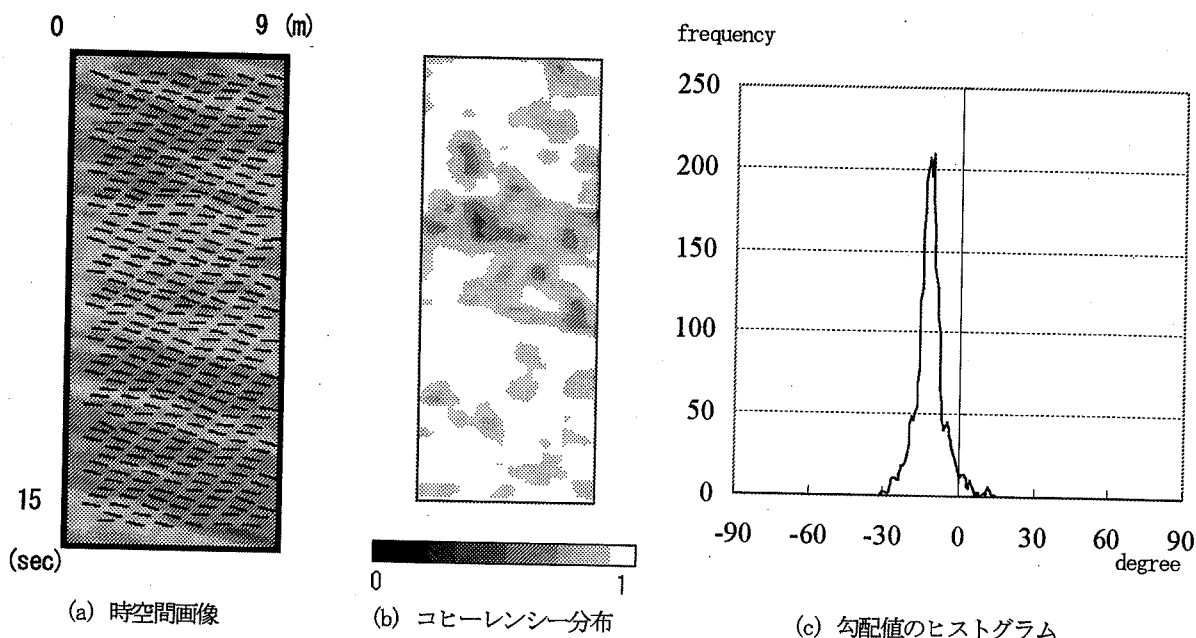


図-9 STIV解析の一例

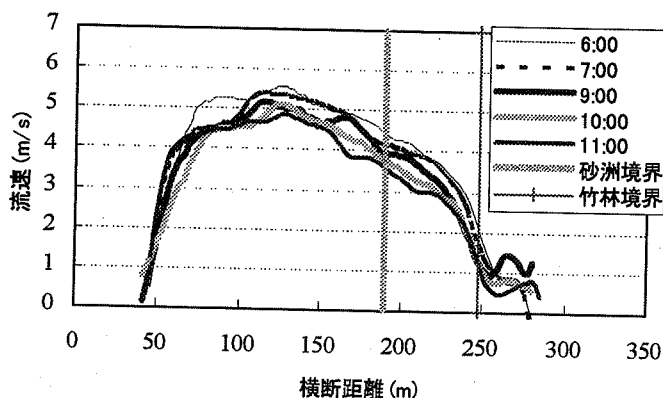


図-10 流速分布の時間変化 (STIV)

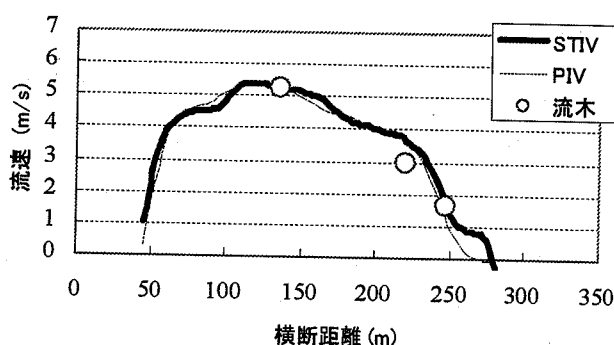


図-11 波紋と浮遊物の速度比較 (AM7:00)

シーとパターン勾配の解析を行う。図-9(a)には、STIV解析で得られた勾配ベクトルのうち、コヒーレンシーが0.8以上のもののみを間引いてプロットしている。多少のばらつきはあるものの縞パターンの傾きに対応した勾配ベクトルが求まっている。コヒーレンシーが0.8以上の勾配値の頻度分布を示したのが図-9(c)だが、明確なピークが得られている。今回のSTIVでは各検査領域のコヒーレンシーを重みとする重み付き平均から勾配ベクトルを算出した。このようにして得られた流速分布をプロットしたのが図-10である。図-8に示したLSPIVの分布と比較すると、分布の非対称性などは類似しているが、詳細な分布には違いが現れた。これは、撮影俯角が小さくなるにつれて、水面変動が両手法の計測空間内の画像情報に及ぼす影響が異なって現れるようになったことが要因と思われる。STIVでは撮影地点近く（横断距離250～300m付近）の流速分布に凹凸が見られるが、これは図-3からもわかるように、樹林帯の切れ目の死水域的な

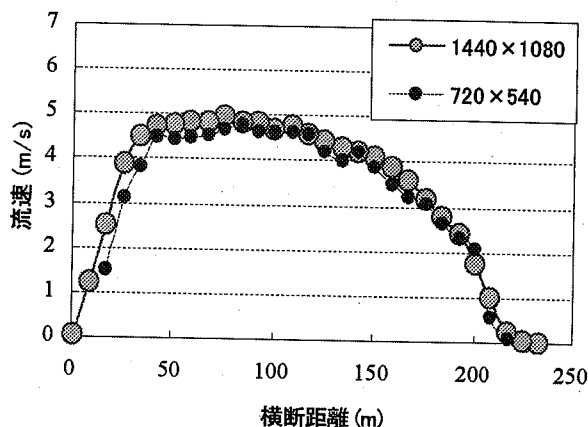


図-12 解像度による違い (LSPIV, AM9:00)

部分に対応していて明確な流向が得られないためである。

図-11は、時刻7:00の映像で確認された3個の流木の流下速度と画像計測の結果を比較したものである。流木の速度は幾何補正画像からマニュアル操作で読み取った。

図より、最大流速から河岸近くの低流速まで良好に波紋の移流速度に一致していることがわかる。

(5) 解像度の影響

今回の撮影はハイビジョンのビデオカメラで行っているが、解像度の違いを調べるために、ハイビジョン映像をもとにして、解像度を通常のデジタルビデオカメラと同等のレベル(720×540画素)に低くした動画を作成し、これまでと同様の解析を行って結果を比較した。図-12にLSPIVの結果を示すが、低解像度の場合、撮影地点から離れるほど流速が過小評価されていることがわかる。これに対し、STIVではさらに解像度を低くしたケースも含めて解像度の影響はまったく見られなかった。

4. 流量ハイドログラフの推定

以上の解析で得られた表面流速分布と河床断面形状のデータを用いて各時刻における洪水流量を算出してみた。図-13に結果を示す。ここでは、表面流を流量に換算する校正係数は0.89とした。前述のように流量ハイドログラフのタイムラグの推定には不明確な点があり、校正係数の精度にも問題があるため観測地点での正確な流量は不明だが、画像解析による方法では浮子流量とほぼ同等の流量が得られた。STIVとLSPIVの比較では、LSPIVの流量が若干小さ目の値を示した。これは、高解像度のビデオを用いたにもかかわらず、対岸の撮影俯角が2度程度と小さかったことや水面変動が無視できなかったことなどが要因と考えられる。ちなみに、比較的大きな俯角で撮影を行った魚野川の洪水流計測では、STIVとLSPIVの結果に大きな違いは現れていない¹⁰⁾。今回の計測では、結果的にはSTIVが浮子観測の結果と比較的良く一致した。

5. あとがき

吉野川で発生した大規模洪水を2通りの画像解析法で計測した結果、浮子観測と同程度の流量計測値を得た。ハイビジョンビデオカメラの導入は、LSPIVの適用において効果が見られたが、STIVでは空間解像度によらず安定した結果が得られた点が注目される。画像計測では流量だけではなく、流速の詳細な横断分布が得られる点に特長があり、今回のケースでは樹林帯による植生抵抗の推定に有用な情報が得られた。今後は、適用事例をさらに積み重ね、非接触計測違法の有用性を示すと同時に、問題点の解消に向けて検討を進めて行く予定である。

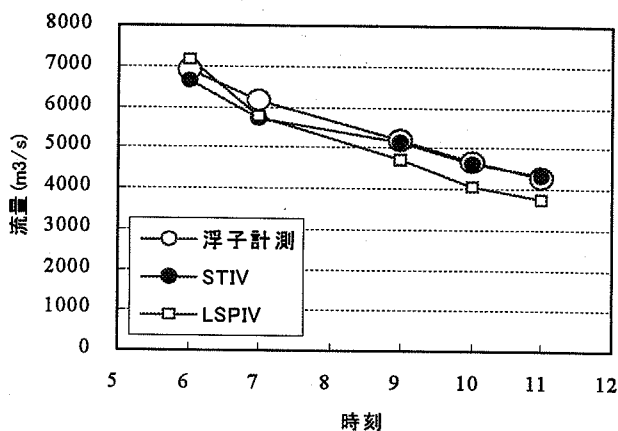


図-13 流量計測結果の比較

謝辞：徳島県吉野川工事事務所からは貴重なデータを頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 藤田一郎, 河村三郎: ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み, 水工学論文集, Vol.38, pp.733 - 738, 1994.
- 2) Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A.: Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.36, No.3, pp.397 - 414, 1998.
- 3) 小林範之, 金目達弥, 藤田一郎: PIVによる洪水時河川流量観測装置の開発, Vol.8, pp.455 - 458, 2002.
- 4) 可視化情報学会編: PIVハンドブック, 森北出版, 2002.
- 5) Muste, M., Z. Xiong, J., Schöne, Z. Li.: Flow diagnostic in hydraulic modeling using image velocimetry, *J. Hydr. Engrg.*, 130(3), 175-185, 2004.
- 6) Bradley, A.A., Kruger, A., Meselhe, E. and Muste, M., Low flow measurement in streams using video imagery, *Water Resources Research*, 38(12), 1315, 2002.
- 7) 青木政一, 藤田一郎, 澤田豊明: 洪水と土砂の観測モニタリング, 河川技術論文集, Vol.9, pp.7 - 12, 2003.
- 8) 藤田一郎, 椿涼太: 小俯角のビデオ画像に対応した河川表面流計測手法の開発, 河川技術論文集, Vol. 7, pp.475 - 478, 2001.
- 9) 藤田一郎, 椿涼太: 時空間濃度勾配法による主流方向表面流速分布の現地計測, 水工学論文集, 46巻, pp.821 - 826, 2002.
- 10) 藤田一郎, 椿涼太: 時空間画像を利用した河川表面波紋の移流速度計測, 河川技術論文集, Vol. 9, pp.55 - 60, 2003.
- 11) 藤田一郎: 実河川を対象とした画像計測技術, 2003年度水工学に関する夏期研修会講義集, 水工学シリーズ03-A-2, 2003.

(2006. 4. 6 受付)